丁酸梭菌对肉鸡腿肌脂肪代谢的影响

赵　旭[1]　丁　晓[2]　杨在宾[2]　沈一茹[1]　张　珊[1]　施寿荣[1*]

（1.中国农业科学院家禽研究所，扬州 225125；2.山东农业大学动物科技学院，泰安 271018）

摘　要：本试验旨在研究丁酸梭菌对肉鸡腿肌脂肪代谢的影响。试验选用 1 日龄爱拔益加肉公鸡 192 只，随机分为 2 个组，每个组 6 个重复，每个重复 16 只鸡。对照组饲喂基础饲粮，试验组饲喂在基础饲粮中添加 1×10^9 CFU/kg 丁酸梭菌的饲粮，试验期为 42 d。结果表明，与对照组相比：1）饲粮中添加丁酸梭菌显著增加了 21 日龄肉鸡腿肌肌内脂肪含量（$P<0.05$），但对 42 日龄肉鸡腿肌肌内脂肪含量无显著影响（$P>0.05$）。2）饲粮中添加丁酸梭菌显著降低了 21 日龄肉鸡腿肌激素敏感脂肪酶活性（$P<0.05$），显著提高了 21 日龄肉鸡腿肌脂蛋白脂酶活性（$P<0.05$），且有增加 42 日龄肉鸡腿肌脂蛋白脂酶活性的趋势（$0.05<P<0.10$）。3）饲粮中添加丁酸梭菌显著降低了 21 日龄肉鸡血清中游离三碘甲状腺原氨酸含量（$P<0.05$）。4）饲粮中添加丁酸梭菌显著降低了 21 日龄肉鸡腿肌脂肪甘油三酯脂肪酶 mRNA 表达量（$P<0.05$）。由此可见，饲粮中添加丁酸梭菌可通过改变 21 日龄肉鸡腿肌脂肪代谢相关酶活性和基因表达来增加肉鸡腿肌肌内脂肪含量。

关键词：丁酸梭菌；肉鸡；腿肌；脂肪代谢

中图分类号：S831　　　　文献标识码：　　　　　　　　文章编号：

收稿日期：2017-02-01

基金项目：国家自然科学基金青年科学基金项目（31601958）；江苏省自然科学基金青年基金项目（BK20150461）

作者简介：赵　旭（1985—），女，山东淄博人，助理研究员，博士，从事家禽营养研究。E-mail: kity850814@163.com

*通信作者：施寿荣，副研究员，E-mail: ssr236@163.com

鸡腿肉是目前市场上深受消费者喜爱的主要肉产品之一，其肌内脂肪含量的增加可以提高其肌肉风味和肌肉嫩度。随着社会经济的发展和人民生活水平的提高，人们对于肉类的消费理念发生了巨大变化，在大量消费鸡腿肉的同时，对鸡腿肉品质的要求也在不断提高。因此，在保证鸡腿肉总产量持续增长的同时，如何增加肌内脂肪含量，进而改善鸡腿肉品质、保障人民肉类消费质量和食品安全成为我们面临的新课题。动物的消化道内存在着大量的微生物，它们对于维持动物胃肠道环境的相对稳定以及促进营养物质的消化吸收起着非常重要的作用。近年来研究发现，肠道微生物具有降低宿主骨骼肌脂肪分解和提高宿主脂蛋白脂酶（LPL）活性的能力[1]。那么，我们是否可以通过外源添加微生态制剂的方法来改变肉鸡肠道中的菌群结构，进而影响肉鸡骨骼肌的脂肪沉积，最终达到改善肉鸡肌肉品质的目的，这有待于进一步证明。丁酸梭菌是一种产丁酸、厌氧的革兰氏阳性芽孢杆菌，前人研究表明，丁酸梭菌具有很好的改善肉鸡肠道微生物区系的作用[2-4]。因此，本研究旨在通过探讨饲粮中添加丁酸梭菌对肉鸡腿肌脂肪代谢的影响，为丁酸梭菌在肉鸡生产上的应用提供新的试验依据，同时也为肉鸡腿肌肌内脂肪沉积的调控提供新的途径。

1　材料与方法

1.1　试验材料

丁酸梭菌（CCTCCM2011384）：菌粉中活菌含量为 5×10^8 CFU/g，由山东宝来利来生物工程股份有限公司提供。

1.2　试验设计

试验选用 1 日龄爱拔益加（AA）肉公鸡 192 只，随机分为 2 个组，每个组 6 个重复，每个重复 16 只鸡。对照组饲喂基础饲粮，为参照 NRC（1994）[5]鸡的营养需要配制的配合饲料，基础饲粮组成及营养水平见表 1；试验组饲喂在基础饲粮中添加 1×10^9 CFU/kg 丁酸梭菌的试验饲粮。为保证丁酸梭菌活力，饲粮均采用粉料，试验期为 42 d。肉仔鸡采用网上平养，自由采食，充足饮水，按正常免疫程序进行免疫接种。

表 1　基础饲粮组成及营养水平（风干基础）

Table 1　Composition and nutrient levels of basal diets (air-dry basis)　　%

项目 Items	含量 Content	
	1～21 日龄 1 to 21 days of age	22～42 日龄 22 to 42 days of age
原料 Ingredients		
玉米 Corn	54.60	60.40
豆粕 Soybean meal	35.20	30.20
豆油 Soybean oil	2.65	3.52
玉米蛋白粉 Corn gluten meal	3.18	2.00
磷酸氢钙 $CaHPO_4$	2.00	1.65
石粉 Limestone	1.25	1.25
食盐 NaCl	0.35	0.35
DL-蛋氨酸 *DL*-Met	0.17	0.10
L-赖氨酸 *L*-Lys (98%)	0.08	0.075
维生素预混料 Vitamin premix1)	0.03	0.025
矿物质预混料 Mineral premix2)	0.20	0.20
氯化胆碱 Choline chloride (50%)	0.26	0.20
抗氧化剂 Antioxidant	0.03	0.03
合计 Total	100.00	100.00
营养水平 Nutrient levels3)		
代谢能 ME/(MJ/kg)	12.35	12.77

粗蛋白质 CP	21.50	19.00
钙 Ca	1.00	0.91
有效磷 AP	0.46	0.40
赖氨酸 Lys	1.15	1.01
蛋氨酸 Met	0.50	0.40
含硫氨基酸 TSAA	0.84	0.71
苏氨酸 Thr	0.82	0.73
色氨酸 Trp	0.25	0.23

1) 维生素预混料为每千克饲粮提供 The vitamin premix provided the following per kg of diets：VA 12 500 IU，VD_3 2 500 IU，VK_3 2.65 mg，VB_1 2.00 mg，VB_2 6.00 mg，VB_{12} 0.025 mg，VE 30 IU，生物素 biotin 0.032 5 mg，叶酸 folic acid 1.25 mg，泛酸 pantothenic acid 12.00 mg，烟酸 nicotinic acid 50.00 mg。

2) 矿物质预混料为每千克饲粮提供 The mineral premix provided the following per kg of diets：Cu 8.00 mg，Zn 75.00 mg，Fe 100.00 mg，Mn 100.00 mg，Se 0.15 mg，I 0.35 mg。

3) 代谢能为计算值，其余为实测值。ME was a calculated value, while the others were measured values.

1.3 样品的采集

分别于试验的第 21 天和 42 天，每个重复选取 1 只健康肉鸡空腹 12 h 后翅静脉采血，分离血清，-20 ℃保存，用于测定血清激素含量；颈静脉放血处死，分割左侧相同部位腿肌用于肌内脂肪含量的测定；取相同部位右侧腿肌液氮速冻，-40 ℃保存，用于测定脂肪代谢酶活性，另取相同部位右侧腿肌置于非液氮型样品 RNA 保存液（北京百泰克生物技术有限公司）中，4 ℃过夜后置于-20 ℃保存，用于测定脂肪代谢相关基因表达量。

1.4 检测指标

1.4.1 肌内脂肪含量

采用乙醚浸提法，用脂肪占肌肉鲜样比例表示。

1.4.2 脂肪代谢酶活性

腿肌 LPL 活性采用总脂酶测试盒[LPL/肝脂酶（HL）测试盒]和总蛋白定量测试盒（带标准，考马斯亮兰法）测定，试剂盒购自南京建成生物工程研究所，测定过程按照试剂盒说明书进行操作。

腿肌激素敏感脂肪酶（HSL）活性参照赵旭[6]方法进行操作。

1.4.3 血清激素含量

采用放射免疫分析试剂盒（北京北方生物技术研究所有限公司）测定血清中游离三碘甲状腺原氨酸（FT_3）和游离甲状腺素（FT_4）含量。

1.4.4 脂肪代谢相关基因表达量

腿肌总 RNA 采用 TRIzol (Invitrogen Life Technologies, Carlsbad, 美国)方法进行提取，反转录和实时荧光定量 PCR 过程均参照 TaKaRa 试剂盒说明书进行操作。心脏型脂肪酸结合蛋白（*H-FABP*）、脂肪型脂肪酸结合蛋白（*A-FABP*）、脂肪甘油三酯脂肪酶（*ATGL*）、肉碱脂酰转移酶 1（*CPT*1）、肉碱脂酰转移酶 2（*CPT*2）、长链乙酰辅酶 A 脱氢酶（*LCAD*）、*LPL* 和磷酸甘油醛脱氢酶（*GAPDH*）实时荧光定量 PCR 引物序列见表 2，由上海 Invitrogen 生物技术有限公司合成。用 $2^{-\triangle\triangle Ct}$ 法来计算基因的表达量。

表 2　实时荧光定量 PCR 引物

Table 2　Primers for real-time PCR

基因 Genes	GeneBank 序列号 GeneBank accession No.	引物序列 Primers sequences (5'→3')	扩增长度 Amplification length/bp	参考文献 Reference
心脏型脂肪酸结合蛋白 *H-FABP*	NM_001030889	F: TGACCAAACCCACCACCATCA R: TGTCTCCTTCCCATCCCACTTC	203	Wang 等[7]
脂肪型脂肪酸结合蛋白 *A-FABP*	NM_204290	F: AAGACTGCTACCTGGCCTGA R: CCCACACCCAGCTCTTTCATA	104	
脂肪甘油三酯脂肪酶 *ATGL*	EU852334	F: TCCTTCACCTTCAGCGTCCA R: AGTGTTGTCCTCCATCTGGTC	113	Cai 等[8]
肉碱脂酰转移酶 1 *CPT*1	DQ314726	F: GATGTTCGACCTCAACCGCT R: ACCGTTTGGAGGAGATGTGG	137	
肉碱脂酰转移酶 2 *CPT*2	NM_001031287	F: TGTTAGGGAACCGTCCAAGC	109	

		R: AAATCCCTGACCCATAGCAGC		
长链乙酰辅酶 A 脱氢酶 *LCAD*	NM_001006511	F: CGTGGTGATTGTGGTTACGGTTA R: TGTTCTCTTTCCCAAGCAAGGC	203	Wang 等[7]
脂蛋白脂酶 *LPL*	NM_205282	F: ACTTGAAGACCCGTGCTCAG R: GGCTGGTCTACCTTGGTCAC	97	Huang 等[9]
磷酸甘油醛脱氢酶 *GAPDH*	NM_204305	F: GGTGAAAGTCGGAGTCAACGG R: CGATGAAGGGATCATTGATGGC	108	Druyan 等[10]

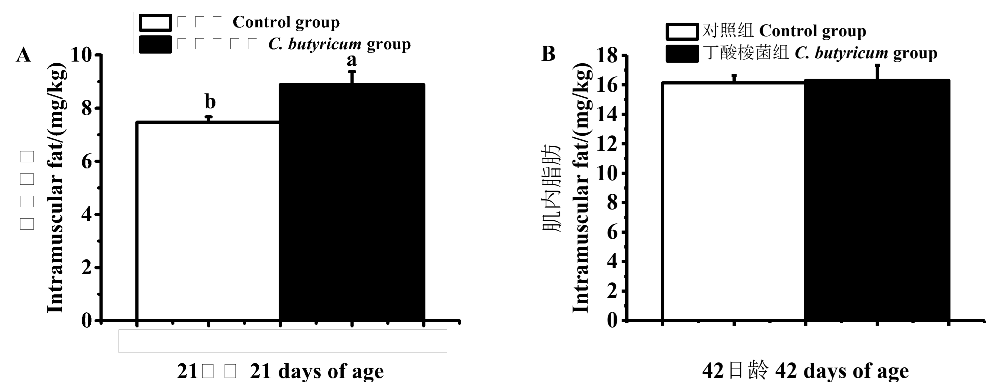
1.5　数据统计分析

数据采用 SAS 9.2 统计软件进行独立样本 t 检验，结果以平均值±标准误表示，P<0.05 为差异显著，0.05<P<0.10 为趋势显著。

2　结　果

2.1　丁酸梭菌对肉鸡腿肌肌内脂肪含量的影响

由图 1 可知，与对照组相比，饲粮中添加丁酸梭菌显著提高了 21 日龄肉鸡腿肌肌内脂肪含量（P<0.05），但对 42 日龄肉鸡腿肌肌内脂肪含量无显著影响（P>0.05）。



数据柱标注不同小写字母表示差异显著（P<0.05）。下图同。

Column values with different small letters mean significant difference (P<0.05). The same as below.

图 1　丁酸梭菌对肉鸡腿肌肌内脂肪含量的影响

Fig.1　Effects of *Clostridium butyricum* on thigh muscle intramuscular fat content of broilers

2.2　丁酸梭菌对肉鸡腿肌脂肪代谢酶活性的影响

由图 2 可知，与对照组相比，饲粮中添加丁酸梭菌显著降低了 21 日龄肉鸡腿肌 HSL 活性（P<0.05），显著提高了 21 日龄肉鸡腿肌 LPL 活性（P<0.05），且具有增加 42 日龄肉鸡腿肌 LPL 活性的趋势（0.05<P<0.10），但对 42 日龄肉鸡腿肌 HSL 活性无显著影响（P>0.05）。

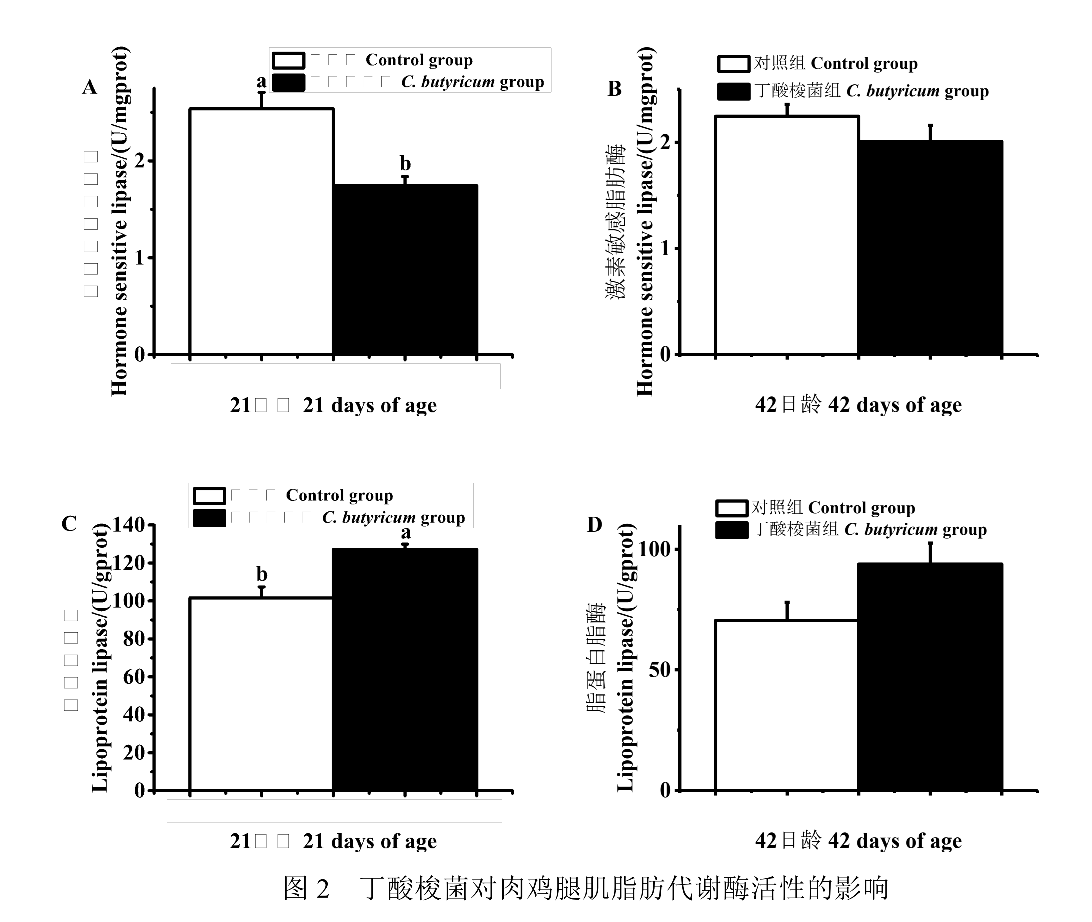


图 2　丁酸梭菌对肉鸡腿肌脂肪代谢酶活性的影响

Fig.2　Effects of *Clostridium butyricum* on thigh muscle lipid metabolism enzyme activities of broilers

2.3　丁酸梭菌对肉鸡血清激素含量的影响

由图 3 可知，与对照组相比，饲粮中添加丁酸梭菌显著降低了 21 日龄肉鸡血清 FT_3 含量（P<0.05），但对 21 日龄肉鸡血清 FT_4 含量以及 42 日龄肉鸡血清 FT_3 和 FT_4 含量均无显著影响（P>0.05）。

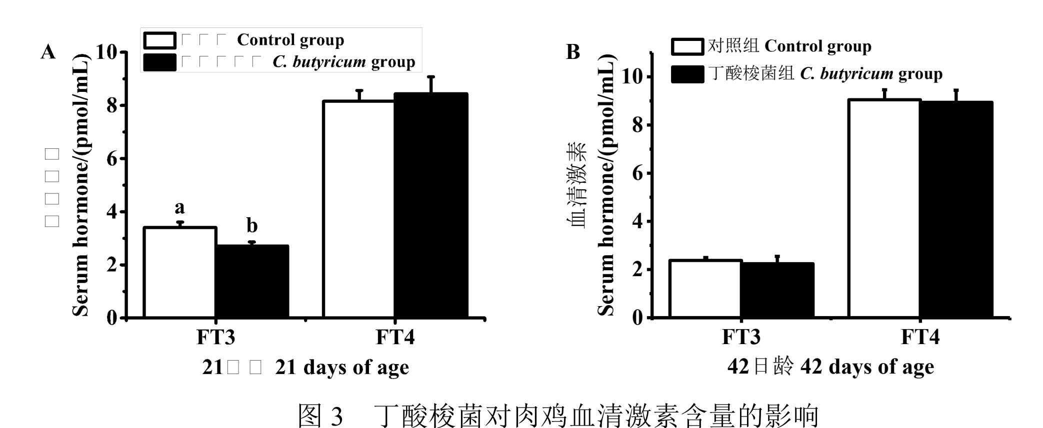
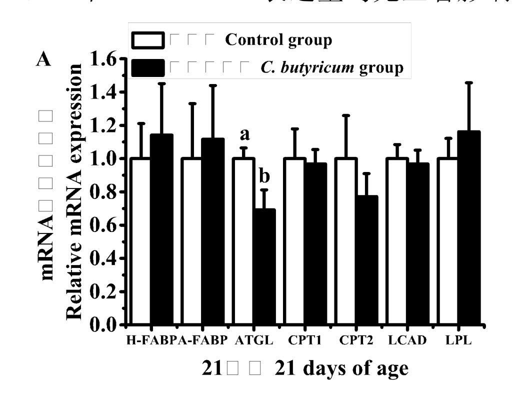


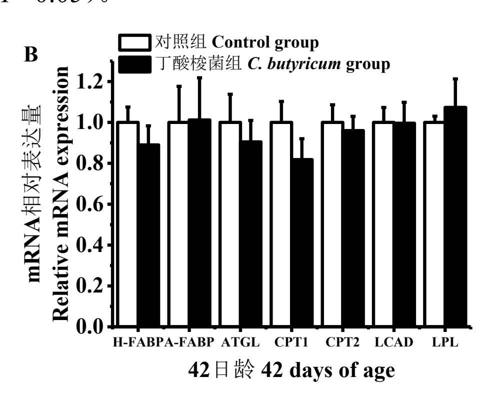
图 3　丁酸梭菌对肉鸡血清激素含量的影响

Fig.3　Effects of *Clostridium butyricum* on serum hormone contents of broilers

2.4　丁酸梭菌对肉鸡腿肌脂肪代谢相关基因表达量的影响

由图 4 可知，与对照组相比，饲粮中添加丁酸梭菌显著降低了 21 日龄肉鸡腿肌 *ATGL* mRNA 表达量（$P<0.05$），但对 21 和 42 日龄肉鸡腿肌 *H-FABP*、*A-FABP*、*CPT*1、*CPT*2、*LCAD* 和 *LPL* mRNA 表达量均无显著影响（$P>0.05$）。





H-FABP：心脏型脂肪酸结合蛋白 heart type-fatty acid binding protein；*A-FABP*：脂肪型脂肪酸结合蛋白 adipocyte fatty-acid binding protein；*ATGL*：脂肪甘油三酯脂肪酶 adiposetfiglycefidelipase；*CPT*1：肉碱脂酰转移酶 1 carnitine palmityl transferase 1；*CPT*2：肉碱脂酰转移酶 2 carnitine palmityl transferase 2；*LCAD*：长链乙酰辅酶 A 脱氢酶 long-chain acyl-CoA dehydrogenase；*LPL*：脂蛋白脂酶 lipoprteinlipase。

图 4　丁酸梭菌对肉鸡腿肌脂肪代谢相关基因表达量的影响

Fig.4　Effects of *Clostridium butyricum* on thigh muscle lipid metabolism related gene expression of broilers

3　讨　论

3.1　丁酸梭菌对肉鸡腿肌肌内脂肪含量的影响

鸡腿肉是市场上深受消费者喜爱的主要肉产品之一，但随着人类生活质量的不断提高，消费者逐渐对鸡腿肉的肉品质提出了越来越高的要求，而肌内脂肪含量的增加正是提高其肌肉风味和肌肉嫩度的关键。目前，已有研究证明肠道菌群结构可以影响动物的脂肪沉积，且肠道厚壁菌门数量与动物脂肪沉积量呈正比，拟杆菌门数量与动物脂肪沉积量呈反比[6]。作者前期研究发现，饲粮中添加 1×10^9 CFU/kg 丁酸梭菌显著降低了 21 日龄肉鸡盲肠拟杆菌门数量，但对 21 和 42 日龄肉鸡盲肠厚壁菌门数量无显著影响[4]，这恰好与本研究中丁酸梭菌显著提高了 21 日龄肉鸡腿肌肌内脂肪含量，但对 42 日龄肉鸡腿肌肌内脂肪含量无显著影

响的现象对应。本试验 21 日龄时丁酸梭菌组高的腿肌肌内脂肪含量表明饲粮中添加 1×10^9 CFU/kg 丁酸梭菌可以提高 21 日龄肉鸡的腿肌肌肉品质。其机制可能是 1~21 日龄阶段肉鸡肠道菌群尚不完善，此时丁酸梭菌的添加更易促进肉鸡健康肠道微生态环境的生成[3,11]，而健康肠道微生态环境可以通过一系列复杂的信息传递过程最终促进动物营养物质的消化吸收以及骨骼肌的脂肪沉积[1]。目前，关于丁酸梭菌对肉鸡腿肌肌内脂肪含量影响的研究相对较少。Zhao 等[4]研究表明，饲粮中添加 1×10^9 CFU/kg 丁酸梭菌 B1（CGMCC 4845）显著提高了 42 日龄肉鸡腿肌肌内脂肪含量，但对 21 日龄肉鸡腿肌肌内脂肪含量无显著影响。廖秀冬[11]研究指出，饲粮中添加 1×10^9 CFU/kg 丁酸梭菌（CGMCC 8187）对 42 日龄肉鸡腿肌肌内脂肪含量无影响。这些试验结果的差异可能与各个试验所采用的肉鸡品种、丁酸梭菌菌种、饲粮组成和饲养管理水平不同有关。

3.2　丁酸梭菌对肉鸡腿肌脂肪代谢酶活性和基因表达量的影响

脂肪沉积是脂肪合成和脂肪分解的净产物。对于肉鸡而言，其脂质代谢和调控与哺乳动物大不相同，体内脂肪主要来源于肝脏内的合成和肠道内的消化吸收，而骨骼肌中脂肪的生成十分有限，因此，对于“定向”提高肉鸡骨骼肌肌内脂肪而言，研究骨骼肌脂肪酸摄取和脂肪分解过程显得更为重要。

H-FABP 和 A-FABP 均属于脂肪酸结合蛋白(FABPs)家族，是一些小分子的细胞内蛋白，其主要功能是参与细胞内脂肪酸的摄取，并协助其运输，近年来研究表明，*H-FABP* 和 *A-FABP* 的表达与肉鸡肌内脂肪的沉积密切相关[12-13]。本试验中，丁酸梭菌组 21 和 42 日龄肉鸡显现出来的腿肌中未改变的 *H-FABP* 和 *A-FABP* mRNA 表达表明，饲粮添加丁酸梭菌未影响到肉鸡腿肌的脂肪酸摄取。

肉鸡骨骼肌脂肪分解成脂肪酸时需要 HSL 和 ATGL 2 种关键限速酶的作用。其中 HSL 可以将甘油三酯（TG）逐级水解为单酰脂肪酸，且其对甘油二酯（DG）的水解活性比对 TG 高 10 倍[14]；而 ATGL 则主要水解 TG，在 TG 水解为 DG 这一步骤中发挥主导作用[15-16]。

在正常骨骼肌细胞中，脂肪分解后产生的脂肪酸的氧化分解主要在线粒体基质中进行。脂肪酸在进入线粒体基质中进行 β 氧化之前，必须先在胞液中脂酰辅酶 A 合成酶的催化下被活化成脂酰辅酶 A。短链或中长链的脂酰辅酶 A 分子（10 个碳原子以下）可容易地渗透通过线粒体内膜，但长链脂酰辅酶 A 难以通过线粒体内膜，必须有载体肉碱的参与，并通过线粒体肉碱脂酰转移酶系统的转运才能进入到线粒体基质中，然后在 LCAD 的催化下进行 β 氧化[17]。线粒体肉碱脂酰转移酶系统主要由位于线粒体膜外侧的 CPT1 和位于膜中间的肉碱/脂酰肉碱移位酶以及位于膜内侧的 CPT2 组成。其中，CPT1 催化长链脂酰辅酶 A 与肉碱结合生成脂酰肉碱，是脂肪酸 β 氧化过程中的一种限速酶[18]。因此，本试验选择 HSL、ATGL、CPT1、CPT2 和 LCAD 等涉及肉鸡骨骼肌脂肪分解的关键酶活性和基因表达进行了测定。本试验中，丁酸梭菌组 21 日龄肉鸡腿肌低的 HSL 活性和 *ATGL* mRNA 表达量表明，饲粮添加丁酸梭菌可以降低 21 日龄肉鸡腿肌的脂肪分解且主要作用于骨骼肌脂肪分解成脂肪酸这一步。

LPL 主要由脂肪细胞、骨骼肌细胞和乳腺细胞等多种实质细胞合成，在肝外组织毛细血管内皮的腔面发挥作用。LPL 能够催化血液中乳糜微粒（CM）和极低密度脂蛋白（VLDL）所携带的 TG 水解成甘油和脂肪酸，从而向脂肪组织提供合成 TG 的原料，促进脂肪的沉积[19]。Voshol 等[20]研究表明，高 LPL 活性与提高的肌肉内的脂肪沉积相关。因此，丁酸梭菌组 21 日龄肉鸡具有高的腿肌肌内脂肪含量可能与丁酸梭菌可以提高 21 日龄肉鸡腿肌中 LPL 活性有关。而丁酸梭菌组 21 日龄肉鸡显现出来的腿肌中未改变的 *LPL* mRNA 表达量表明腿肌中高的 LPL 活性未必与其对应的 mRNA 表达量相一致，其原因在于丁酸梭菌可能更多的是通过一系列复杂的过程改变 LPL 结构而非其含量来使 LPL 活性得以提高。

本试验中，饲粮添加丁酸梭菌降低 21 日龄肉鸡腿肌 HSL 活性和 *ATGL* mRNA 表达量、提高 21 日龄肉鸡腿肌 LPL 活性的现象可以解释为丁酸梭菌可以改变 21 日龄肉鸡的肠道微生物组成[3-4]，从而抑制了肠上皮细胞血管生成素样蛋白 4（ANGPTL4）的生成，使得通过

血液进入动物骨骼肌的ANGPTL4含量减少[1]，进而缓解了ANGPTL4对LPL活性的抑制[1,21]以及降低了动物骨骼肌的脂肪分解（如降低 *ATGL* mRNA 表达量等）[22]，但这有待于进一步研究证实。

关于丁酸梭菌对肉鸡腿肌脂肪代谢酶活性和基因表达量影响的研究很少。Zhao 等[4]研究表明，饲粮中添加 $1×10^9$ CFU/kg 丁酸梭菌 B1（CGMCC 4845）对 21 和 42 日龄肉鸡腿肌中的 HSL 和 LPL 活性均无影响，但具有提高 42 日龄肉鸡腿肌 *LPL* mRNA 表达量的趋势。其试验结果与本试验有差异的原因可能在于 2 个试验所采用的肉鸡品种、丁酸梭菌菌种和饲养管理水平不同。

3.3　丁酸梭菌对肉鸡血清激素含量的影响

甲状腺激素包括三碘甲状腺原氨酸和甲状腺素 2 种，具有刺激脂肪合成和促进脂肪分解的双重功能，且分解高于合成[23]。甲状腺激素能够增加脂肪组织对儿茶酚胺和胰高血糖素的敏感性，增加脂肪组织中腺苷酸环化酶的活性，使 ATP 转化为环磷酸腺苷（cAMP），cAMP 作为第 2 信使激活 cAMP-依赖性蛋白激酶，使无活性的 HSL 转变为有活性的 HSL，促进脂肪组织脂解过程加快[24]。本试验中，丁酸梭菌组 21 日龄肉鸡血清中低的 FT_3 含量表明添加丁酸梭菌降低了 21 日龄肉鸡脂肪分解能力，这正与本试验发现的丁酸梭菌显著增加了 21 日龄肉鸡腿肌肌内脂肪含量，降低了其腿肌 HSL 活性和 *ATGL* mRNA 表达量相对应。

4　结　论

① 饲粮中添加丁酸梭菌可以显著提高 21 日龄肉鸡腿肌肌内脂肪含量，但对 42 日龄肉鸡腿肌肌内脂肪含量无显著影响。

② 饲粮中添加丁酸梭菌可以显著降低 21 日龄肉鸡腿肌 HSL 活性和 *ATGL* mRNA 表达量，显著降低 21 日龄肉鸡血清 FT_3 含量，显著提高 21 日龄肉鸡腿肌 LPL 活性，但对 42 日龄肉鸡腿肌脂肪代谢酶活性和基因表达量以及血清激素含量均无显著影响。

参考文献：

[1] GREINER T,BÄCKHED F.Effects of the gut microbiota on obesity and glucose homeostasis[J].Trends in Endocrinology and Metabolism,2011,22(4):117–123.

[2] ZHANG B K,YANG X,GUO Y M,et al.Effects of dietary lipids and *Clostridium butyricum* on the performance and the digestive tract of broiler chickens[J].Archives of Animal Nutrition,2011,65(4):329–339.

[3] YANG C M,CAO G T,FERKET P R,et al.Effects of probiotic,*Clostridium butyricum*,on growth performance,immune function,and cecal microflora in broiler chickens[J].Poultry Science,2012,91(9):2121–2129.

[4] ZHAO X,GUO Y M,GUO S S,et al.Effects of *Clostridium butyricum* and *Enterococcus faecium* on growth performance,lipid metabolism,and cecal microbiota of broiler chickens[J].Applied Microbiology and Biotechnology,2013,97(14):6477–6488.

[5] NRC.Nutrient requirements of poultry[S].9th rev. ed.Washington,D.C.:National Academy Press,1994.

[6] 赵旭.丁酸梭菌对肉鸡脂肪代谢的影响及其机理研究[D].博士学位论文.北京:中国农业大学,2014:36–37.

[7] WANG X J,SONG Z G,JIAO H C,et al.Dexamethasone facilitates lipid accumulation in chicken skeletal muscle[J].Stress,2012,15(4):443–456.

[8] CAI Y L,SONG Z G,ZHANG X H,et al.Increased *de novo* lipogenesis in liver contributes to the augmented fat deposition in dexamethasone exposed broiler chickens (*Gallus gallus domesticus*)[J].Comparative Biochemistry and Physiology Part C:Toxicology & Pharmacology,2009,150(2):164–169.

[9] HUANG J B,ZHANG Y,ZHOU Y B,et al.Effects of epigallocatechin gallate on lipid

metabolism and its underlying molecular mechanism in broiler chickens[J].Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition,2015,99(4):719–727.

[10] DRUYAN S,CAHANER A,ASHWELL C M.The expression patterns of hypoxia-inducing factor subunit α-1,heme oxygenase,hypoxia upregulated protein 1,and cardiac troponin T during development of the chicken heart[J].Poultry Science,2007,86(11):2384–2389.

[11] 廖秀冬.丁酸梭菌的筛选及其对动物抗氧化能力和肉鸡肉品质影响的研究[D].博士学位论文.北京:中国农业大学,2015:38–46.

[12] LI W J,LI H B,CHEN J L,et al.Gene expression of heart- and adipocyte-fatty acid-binding protein and correlation with intramuscular fat in Chinese chickens[J].Animal Biotechnology,2008,19(3):190–194.

[13] YE M H,CHEN J L,ZHAO G P,et al.Associations of *A-FABP* and *H-FABP* markers with the content of intramuscular fat in *Beijing-You* chicken[J].Animal Biotechnology,2009,21(1):14–24.

[14] ALI Y B,CARRIÈRE F,VERGER R,et al.Continuous monitoring of cholesterol oleate hydrolysis by hormone-sensitive lipase and other cholesterol esterases[J].Journal of Lipid Research,2005,46(5):994–1000.

[15] ZIMMERMANN R,STRAUSS J G,HAEMMERLE G,et al.Fat mobilization in adipose tissue is promoted by adipose triglyceride lipase[J].Science,2004,306(5700):1383–1386.

[16] LEE K,SHIN J,LATSHAW J D,et al.Cloning of adipose triglyceride lipase complementary deoxyribonucleic acid in poultry and expression of adipose triglyceride lipase during development of adipose in chickens[J].Poultry Science,2009,88(3):620–630.

[17] WANG X J,LIN H,SONG Z G,et al.Dexamethasone facilitates lipid accumulation and mild feed restriction improves fatty acids oxidation in skeletal muscle of broiler chicks (*Gallus gallus*

domesticus)[J].Comparative Biochemistry and Physiology Part C:Toxicology & Pharmacology,2010,151(4):447–454.

[18] WANG X J,SONG Z G,JIAO H C,et al.Skeletal muscle fatty acids shift from oxidation to storage upon dexamethasone treatment in chickens[J].General and Comparative Endocrinology,2012,179(3):319–330.

[19] GOLDBERG I J.Lipoprotein lipase and lipolysis:central roles in lipoprotein metabolism and atherogenesis[J].Journal of Lipid Research,1996,37(4):693–707.

[20] VOSHOL P J,JONG M C,DAHLMANS V E H,et al.In muscle-specific lipoprotein lipase-overexpressing mice,muscle triglyceride content is increased without inhibition of insulin-stimulated whole-body and muscle-specific glucose uptake[J].Diabetes,2001,50(11):2585–2590.

[21] YOSHIDA K,SHIMIZUGAWA T,ONO M,et al.Angiopoietin-like protein 4 is a potent hyperlipidemia-inducing factor in mice and inhibitor of lipoprotein lipase[J].Journal of Lipid Research,2002,43(11):1770–1772.

[22] MANDARD S,ZANDBERGEN F,VAN STRATEN E,et al.The fasting-induced adipose factor/angiopoietin-like protein 4 is physically associated with lipoproteins and governs plasma lipid levels and adiposity[J].The Journal of Biological Chemistry,2006,281(2):934–944.

[23] PUCCI E,CHIOVATO L,PINCHERA A.Thyroid and lipid metabolism[J].International Journal of Obesity,2000,24(Suppl.2):S109–S112.

[24] 苗志国.金华猪与长白猪脂肪代谢和消化功能发育差异的研究[D].博士学位论文.杭州:浙江大学,2008:13.

Effects of *Clostridium butyricum* on Thigh Muscle Lipid Metabolism of Broilers

ZHAO Xu[1] DING Xiao[2] YANG Zaibin[2] SHEN Yiru[1] ZHANG Shan[1] SHI Shourong[1*]

(1. *Poultry Institute*, *Chinese Academy of Agricultural Sciences*, *Yangzhou* 225125, *China*; 2. *College of Animal Science and Technology*, *Shandong Agricultural University*, *Tai'an* 271018, *China*)

Abstract: This experiment was conducted to investigate the effects of *Clostridium butyricum* on thigh muscle lipid metabolism of broilers. A total of 192 one-day-old male Arbor Acres (AA) broilers were randomly allocated into 2 groups with 6 replicates per group and 16 broilers per replicate. Birds in the control group were fed a basal diet, and the others in the test group were fed the basal diet supplemented with 1×10^9 CFU/k *Clostridium butyricum*. The experiment lasted for 42 days. The results showed as follows, compared with the control group: 1) dietary supplementation of *Clostridium butyricum* significantly increased the thigh muscle intramuscular fat content of broilers at 21 days of age (P<0.05), but had no effect on the thigh muscle intramuscular fat content of broilers at 42 days of age (P>0.05). 2) Dietary supplementation of *Clostridium butyricum* significantly decreased the thigh muscle hormone sensitive lipase activity of broilers at 21 days of age (P<0.05), significantly increased the thigh muscle lipoprotein lipase (LPL) activity of broilers at 21 days of age (P<0.05), and tended to increase the thigh muscle LPL activity of broilers at 42 days of age (0.05<P<0.10). 3) Dietary supplementation of *Clostridium butyricum* significantly decreased the serum free triiodothyronine content of broilers at 21 days of age (P<0.05). 4) Dietary supplementation of *Clostridium butyricum* significantly decreased the thigh muscle adipose triglyceride lipase mRNA expression of broilers at 21 days of age (P<0.05). In conclusion, dietary supplementation with *Clostridium butyricum* can positively affect

---

*Corresponding author, associate professor, E-mail: ssr236@163.com （责任编辑　武海龙）

intramuscular fat content by regulating the lipid metabolism related enzyme activities and gene expression in the thigh muscle of broilers at 21 days of age.

Key words: *Clostridium butyricum*; broilers; thigh muscle; lipid metabolism